

В.Е. Храповский, А.А. Сулимов

О ВОЗНИКНОВЕНИИ КОНВЕКТИВНОГО ГОРЕНИЯ В ПИКРИНОВОЙ КИСЛОТЕ

На основе совместной оптической регистрации и измерения давления в нескольких точках по высоте образца изучено возникновение конвективного горения в пикриновой кислоте при поджигании ее с закрытого торца. Исследовано влияние размера частиц, плотности ВВ ($0,7—1,1 \text{ г/см}^3$), высоты образца, мощности воспламенителя, параметров канала оболочки. Получены пространственные профили распределения давления. Выявлена зависимость критической высоты слоя, при достижении которой возникает конвективное горение, от исследованных параметров. Выделены два типичных случая, реализующихся на начальной стадии развития процесса. Для одного характерно плавное повышение давления до и после фронта свечения, для другого — наличие вблизи него пикообразного распределения давления. Установлены условия, в которых реализуется тот или иной случай. Предложено объяснение полученным результатам.

Одна из стадий развития взрыва в пористых взрывчатых веществах (ВВ) — конвективное горение (КГ). Результаты исследования последнего при наличии свободного оттока продуктов горения от открытой поверхности ВВ достаточно полно представлены в [1]. При аварийных взрывах очаг воспламенения возникает, как правило, в объеме ВВ, содержащем свободные поверхности. Развитие горения в этом случае испытывает воздействие разгрузки из-за движения ВВ. Переход от послойного горения к конвективному в таких условиях практически не исследован. Изучению этого процесса и посвящена настоящая работа.

Методика

Использовалась металлическая неразрушающаяся щелевая оболочка, в канал которой плотно вставлялась прозрачная плексигласовая трубка с внутренним диаметром 5 и длиной 170 мм. Оболочка изготовлена из термообработанной стали, обладающей повышенной ударной прочностью, толщина стенок составляла 25, ширина щели 1 мм. Трубка уплотнялась при помощи фторопластовых колец: с нижнего торца — болтом-воспламенителем, содержащем нихромовую спираль, с верхнего — болтом с отверстием, равном внутреннему диаметру канала. Проводилась оптическая регистрация свечения процесса через щель оболочки высотой 155 мм с помощью фоторегистратора и одновременно записывалось давление $p(t)$ несколькими пьезокварцевыми датчиками Т-6000, расположенными по боковой поверхности через 30—60 мм по высоте оболочки. Применение трубок с небольшим внутренним диаметром обеспечивало более частый выход фронта свечения, развивающийся при возникновении конвективного горения по отдельным порам внутри образца, на боковую поверхность, через которую проводится фоторегистрация процесса. При этом улучшается точность определения момента появления конвективного горения по началу регистрации прерывистого фронта свечения¹.

В описанной постановке, схема которой приведена в [4], исследовались образцы с высотой слоя ВВ, не превышающей 170 мм. Для образцов с большей длиной увеличение высоты канала достигалось подсоединением сверху дополнительной металлической оболочки с тем же внутренним диаметром, что и в плексигласовой трубке, при этом фоторегистрация проводилась лишь на начальных 155 мм.

Полученные данные синхронизировались во времени по моменту прекращения свечения после развития процесса, связанного с разрушением плексигласовой трубки. На записях $p(t)$ при этом наблюдался резкий спад давления.

¹Оценка теплопотерь через боковую поверхность [2, 3] дает значение, не превышающее 5 % тепла, выделяемого при сгорании воспламенителя.

Пикриновая кислота (ПК) размещалась в канале оболочки и поджигалась у нижнего закрытого торца нихромовой спиралью и навеской 0,2 г (12 мм) измельченного дымного пороха (ДРП). В отдельных экспериментах варьировалась масса ДРП и нихромовая спираль заменялась электровоспламенителем МБ-2. Высота слоя ПК изменялась от 48 до 310 мм, плотность от насыпной (0,7 г/см³) до 1,1 г/см³, получаемой порционным прессованием. Размер частиц кислоты, определенный по газопроницаемости насыпного слоя, составлял $d_r = 70$ мкм. Отдельные эксперименты проведены с $d_r = 20$ мкм.

Противоположный от воспламенителя торец в большинстве опытов был открыт. Лишь в отдельных случаях он закрывался дюралюминиевой мембраной толщиной 1 мм, которая контактировала с верхней границей ПК.

Обработкой записей $p(t)$ получали пространственные профили распределения давления $p(x)$ в различные моменты времени. Для этого по значениям $p(t)$ нескольких датчиков с интерполяцией данных в промежуточных точках проводились изобары давления по длине оболочки в зависимости от времени. Изобары располагались с короткими интервалами изменения p . По ним для любого выбранного момента времени можно было построить профиль $p(x)$, учитывая монотонное изменение давления между изобарами. Используя небольшие интервалы изменения p при переходе от одной изобары к другой, можно указанные профили получать с достаточной точностью.

При обработке записей $p(t)$, содержащих пикообразный профиль давления на начальной стадии с последующими его колебаниями, метод изобар дополнялся следующими построениями. Для первоначального пикообразного профиля строилась $x(t)$ -диаграмма перемещения максимальной амплитуды давления, кривая $p(x)$ -изменения величины p_{max} в пике. Используя изобары на начальной стадии роста p , данные по перемещению и изменению максимальной величины давления в пике, получали профили $p(x)$ с резким нарастанием давления.

Аналогично получали профили $p(x)$, соответствующие колебаниям давления. Синхронизация с оптическими записями позволяла фиксировать на них положение фронта свечения. По кривой $p_v(t)$ на воспламенительном торце определялось характерное время t_e изменения величины p в e раз на участке его экспоненциального нарастания.

Исследовалось влияние высоты слоя, плотности, размера частиц ПК, навески воспламенителя и свойств внутренней поверхности канала оболочки на временные и пространственные параметры процесса возникновения и начальной стадии развития конвективного горения.

Экспериментальные результаты

Влияние начальной высоты слоя ВВ H изучалось на образцах насыпной плотности. Установлено значение критической высоты слоя $H_{кр}$ [5], при которой регистрируется возникновение и развитие конвективного горения, $H_{кр} = 155$ мм. При этой высоте в двух опытах из трех наблюдался выброс ПК из оболочки при $p_{max} = 100 \div 120$ атм, достигаемом за 2,5—3,0 мс при сгорании основного количества воспламенителя (ДРП). В третьем возникло и развивалось конвективное горение и максимальное давление достигало нескольких килобар. При $H < H_{кр}$ происходил только выброс слоя ВВ, при $H = 195 \div 300$ мм стабильно возбуждалось конвективное горение и развивалось до низкоскоростной детонации. Она возникала при $p \sim 5 \div 7$ кбар и распространялась со скоростью $v = 700 \div 2500$ м/с. (Нормальная детонация при используемых диаметрах и плотностях ПК имеет большую скорость и давление [6].)

Типичная фоторегистрограмма процесса свечения при возникновении конденсированного горения представлена на рис. 1. Видно, что ровный фронт свечения 1 сменяется менее ярким прерывистым 2, характерным для конвективного горения. Исследования [4] показали, что движение ровного

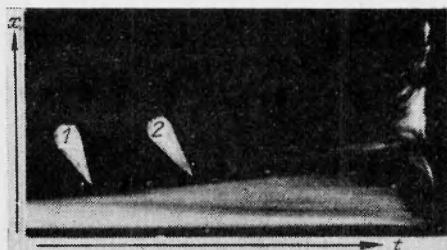


Рис. 1. Типичная фоторегистрограмма при возникновении конвективного горения в насыпных образцах ($\rho = 0,7 \text{ г/см}^3$, $H = 155 \text{ мм}$).

1 — движение и уплотнение ПК под действием продуктов сгорания воспламенителя; 2 — возникновение конвективного горения.

менту появления конвективного режима $v_{\text{max}} = 20 \div 30 \text{ м/с}$. Передний фронт горения в начальный момент времени двигался с близкой скоростью, в дальнейшем ускоряясь до 180 м/с на высоте 155 мм . Расстояние, на котором регистрировалось возникновение конвективного горения l_1 , время его появления $t_{\text{с}}$, измеряемое по записи $p_{\text{в}}(t)$ датчика, расположенного на воспламенительном торце, зависели от условий постановки эксперимента и приведены в таблице, где p_{max} , $p_{\text{ф}}$, $p_{\text{пик}}$ — давления за фронтом, во фронте свечения и в пике. В отдельных случаях из места возникновения горения распространялась по светящимся продуктам сгорания воспламенителя обратная волна, амплитуда которой не превышала 10 атм .

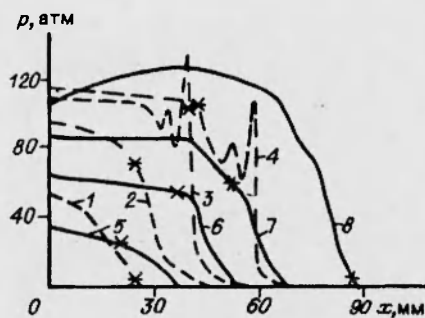
Возникновение конвективного горения характеризуется не только изменением характера свечения по сравнению с выбросом ПК, но и трансформацией кривых $p(t)$ и пространственных профилей $p(x)$. Так, в случае выброса слоя ВВ высотой 155 мм давление на воспламенительном торце $p_{\text{в}}(t)$ после достижения максимального значения $100\text{--}120 \text{ атм}$ некоторое время ($\approx 0,6 \text{ мс}$) поддерживалось на этом уровне, а затем спадало. При возникновении конвективного горения в слое с такой же начальной высотой подъем давления на начальной стадии (до 115 атм) протекает аналогично. Однако в последующем вместо выхода на постоянное значение наблюдается лишь некоторое уменьшение темпа роста $p_{\text{в}}(t)$, который в дальнейшем возрастает.

Характерные пространственные профили давления в случае возникновения конвективного горения и выброса ПК представлены на рис. 2. Передний фронт пламени (свечение) отмечен звездочкой, соответствующее значение давления во фронте в момент возникновения горения (кривая 7) равнялось $p_{\text{ф}}$ (см. таблицу). Расстояние между фронтом свечения и началом подъема давления характеризовало ширину зоны фильтрации $l_{\text{ф}}$. Видно, что на начальной стадии (см. рис. 2, 1, 2 и 5, 6), как при выбросе ПК, так и в случае возникновения горения наблюдается плавный рост давления перед фронтом свечения, возрастание ширины зоны фильтрации, наличие сравнительно небольшого перепада давления за фронтом. Возникновение и начало развития конвективного горения (рис. 2, 7, 8) характеризуются

Опыт	H , мм	ρ , г/см ³	Оболочка	$t_{\text{с}}$, мкс	p_{max} , атм	$p_{\text{ф}}$, атм	$p_{\text{пик}}$, атм	$t_{\text{кг}}$, мс	l_1 , мм
1	155	0,7	Плексиглас	780	105	45	—	2,1	35
2	280	0,7		2070	90	60	—	4,0	51
3*	293	0,7		1610	250	95	—	5,1	77
4*	288	0,7		1630	155	60	—	3,5	89
5	298	1,0		700	285	—	530	2,0	65
6*	310	1,1	Металл	220	430	—	1000	1,0	12
7	106	1,0		290	240	—	410	0,3	12
8	108	0,7		—	184	—	216	2,3	—
9	48	0,7		710	125	—	113	2,6	—

*Опыты с мембраной, расположенной на противоположном от воспламенителя торце.

Рис. 2. Пространственные профили давления при возникновении (5—8) конвективного горения ($H = 280$ мм) и при выбросе (1—4) ВВ ($H = 155$ мм).
 t , мс: 1 — 1,21; 2 — 1,77; 3 — 1,97; 4 — 2,2; 5 — 2,7; 6 — 3,5; 7 — 4,0; 8 — 4,6.



снижением l_{ϕ} и увеличением перепада давления за фронтом в зоне шириной 15—30 мм, т.е. давления во фронте и за ним могут заметно отличаться. Однако характер нарастания $p(x)$ вблизи фронта пламени не изменился.

В случае выброса ПК пространственные профили, начиная с определенного момента, имели пикообразный вид (рис. 2, 3, 4): давление сначала быстро поднималось до близкого к максимальному значению $p_{\text{пик}}$, после чего резко уменьшалось с последующим более плавным, частично колебательным изменением. При этом амплитуда $p_{\text{пик}}$ снижалась по мере развития процесса. Фронт свечения при таком профиле может находиться как на стадии нарастания давления до $p_{\text{пик}}$ (см. рис. 2, 3), так и за положением пика (кривая 4).

Рост длины насыпного слоя ПК не вызывало изменений в характере нарастания давления вблизи фронта свечения при возникновении горения, менялись только значения $t_{\text{кр}}$, p_{ϕ} и p_{max} (см. таблицу). Следует отметить, что с длительностью протекания первой стадии $t_{\text{кр}}$ повышалось и p_{ϕ} , при котором возникало горение.

Влияние воспламенителя. Уменьшение на 30 % высоты слоя ДРП, поджигаемого нихромовой спиралью, вызывало увеличение $H_{\text{кр}}$. Невоспроизводимое развитие процесса, связанное с выбросом ПК или развитием в ней конвективного горения (аналогично рис. 1), наблюдалось на образцах с начальной длиной ~ 300 мм.

Увеличение слоя ДРП до 20—22 мм приводило к интенсификации развития процесса: максимальная величина скорости распространения ровного фронта свечения возрастала до 70 м/с при $l = 90$ мм, движение прерывистого фронта конвективного горения начиналось с 300 и ускорялось до 460 м/с ($l = 155$ мм).

Неожиданный результат получен при замене нихромовой спирали на электровоспламенитель МБ-2. Эксперименты приводились при слоях ДРП и ПК с $l = 12$ и $200 \div 300$ мм соответственно и при наличии мембраны на противоположном от воспламенителя торце. Если при использовании нихромовой спирали в этих условиях начиналось конвективное горение, то ее замена на МБ-2, обеспечивающий интенсивный поток горячих продуктов, вызывала только развитие стадии уплотнения ПК без конвективного горения.

Роль размера частиц. При уменьшении размера кристаллов ПК до $d_r = 20$ мкм в насыпном слое высотой ~ 300 мм, инициируемом 0,2 г ДРП, возникновения и развития конвективного горения в трех проведенных экспериментах не наблюдалось. Исследования статической сжимаемости ПК показали, что образцы с уменьшенным размером частиц уплотняются более интенсивно, особенно при низких давлениях (до 10—15 атм). Следовательно, трудности в возникновении КГ при использовании мелких частиц, кроме уменьшения начального размера пор, можно объяснить еще и большим уплотнением слоя ВВ под действием воспламенителя, что приводит к дополнительному сокращению их размера. Подтверждением этому служит остаток уплотненного слоя ПК в верхней части оболочки после эксперимента, в котором на противоположном от воспламенителя торце располагалась мембрана.

Влияние начальной плотности образцов. Увеличение ρ до 1,0 г/см³ (см. таблицу) сопровождалось изменением характера протекания процесса.

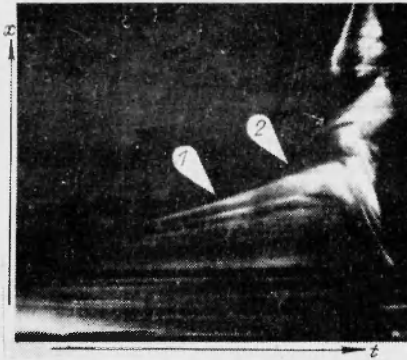


Рис. 3. Фоторегистрограмма развития КГ для образца с плотностью $1,0 \text{ г/см}^3$.
1 — движение и уплотнение ПК; 2 — начало конвективного горения.

Возникающее после уплотнения и движения слоя ПК конвективное горение имело большую глубину пульсаций свечения (рис. 3) по сравнению с насыпными образцами (см. рис. 1). Профили распределения давления, начиная с определенного момента времени, еще до возникновения горения, имели пикообразный вид. Однако в отличие от случая с

выбросом ПК амплитуда давления в пике возрастала со временем и в момент начала горения заметно превышала p_{max} за фронтом свечения. Описание процессов, происходящих в дальнейшем при развитии горения вплоть до низкоскоростной детонации, здесь не приводится.

Влияние состояния внутренней поверхности канала оболочки. Изложенные выше результаты получены при размещении ПК в канале прозрачной полированной плексигласовой трубки. Влияние шероховатости поверхности канала на возникновение конвективного горения изучалось на насыпных и подпрессованных до $1,0\text{—}1,1 \text{ г/см}^3$ образцах. Ухудшение поверхности с 8—9 класса до 5—6 достигалось заменой прозрачной полированной плексигласовой трубки на металлическую оболочку с каналом, образующимся после сверления, при этом изменялась теплопроводность. В металлической оболочке измерялось только давление $p(t)$ несколькими датчиками, расположенными по высоте.

Применение шероховатой оболочки привело к существенному уменьшению критической высоты слоя (до $H_{\text{кр}} \leq 48 \text{ мм}$), что согласуется с [5]. Существенно возросло также p_{max} , которое при длине насыпного слоя ПК 48 мм в шероховатой оболочке достигало 1100 атм (вместо 80—100 атм в плексигласовой трубке), что связано с возникновением конвективного горения.

Распределение давления по длине имело пикообразный профиль. За время $t_{\text{кр}}$ принимался момент начала регистрации возрастающего по мере протекания процесса пикообразного профиля $p(t)$ датчиком, расположенным на кратчайшем расстоянии от спирали. Сравнение распределений давления показывает, что на начальной стадии наблюдается совпадение профилей $p(x)$ со случаем расположения образца в оболочке с меньшей шероховатостью (рис. 4, 5, 6). В дальнейшем при одинаковых временах развития процесса давление в пике за ним возрастает сильнее при использовании металлической оболочки. Скорости движения пикообразного профиля, определяемые по $x(t)$ -диаграмме перемещения максимальной амплитуды давления в пике, до $x = 40 \text{ мм}$ слабо отличаются при изменении шероховатости оболочки, на большей длине скорость движения пикообразного профиля в металлической оболочке выше.

Замена плексигласовой оболочки на металлическую при плотности образцов $\rho = 1,0\text{—}1,1 \text{ г/см}^3$ сопровождалась уменьшением характерного времени повышения давления на воспламенительном торце до

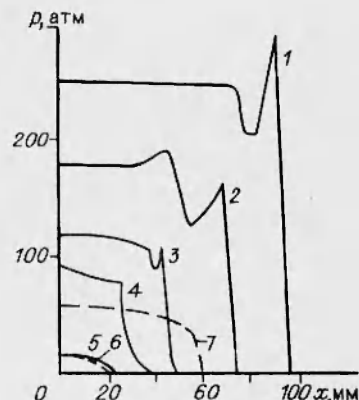


Рис. 4. Профили $p(x)$ при развитии процесса в насыпных образцах с высотой слоя 48 мм в металлической (1—5) и плексигласовой (6, 7) оболочках.
 t , мс: 1 — 2,88, 2 — 2,76, 3, 7 — 2,6, 4 — 2,35, 5, 6 — 1,19.

290 мкс ($\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$) и 220 мкс ($\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$) (см. таблицу). Эти значения соответствуют сгоранию воспламенителя в замкнутом объеме ($t_e = 245$ мкс). Изменялось и время появления и интенсивность развития конвективного горения. Пикообразный профиль $p(x)$ формировался уже при $x = 22 - 24$ мм и имел более высокую амплитуду давления в пике — 350 ($\rho = 1,0 \text{ г/см}^3$) и 1000 атм ($\rho = 1,1 \text{ г/см}^3$), которая быстро возрастала во времени.

Обсуждение результатов

Анализируя полученные данные, следует отметить, что возникновение и начальная стадия развития конвективного горения в пикриновой кислоте происходит при разных давлениях на воспламенительном торце и во фронте пламени в зависимости от условия постановки эксперимента (см. таблицу), т.е. зависит от предыстории процесса уплотнения ВВ и изменения давления в полости, образующейся на этой стадии. При этом различаются и профили $p(x)$ как в продуктах сгорания, так и в слое ПК, примыкающего к ним.

Можно выделить два типичных случая. Для первого характерно сравнительно плавное нарастание давления в слое ВВ за 10—25 мм перед фронтом пламени с дальнейшим его повышением до p_{\max} в продуктах сгорания (см. рис. 2, 5—8). Начало развития горения на записях $p(t)$ и пространственных профилях $p(x)$ (кривая 7) в этом случае не сопровождается какими-либо аномальными изменениями по сравнению с предшествующей стадией. Этот случай реализуется при невысоких темпах нарастания давления на воспламенительном торце ($t_e \geq 780$ мкс). Отсутствие заметного изменения давления во фронте при возникновении горения указывает на слабое газовыделение в нем, что свидетельствует о низкой интенсивности протекающих процессов и малой поверхности воспламенения частиц пикриновой кислоты во фронте. Подтверждением этого служит слабое свечение на оптических записях. Величины $p_{\phi} = 45 \div 95$ атм в момент возникновения конвективного горения, их увеличение по мере возрастания t_e (см. опыты 1 и 3 в таблице) указывают на важное значение при возникновении и развитии горения предшествующей стадии, связанной с уплотнением ПК.

При повышенном темпе роста давления ($t_e < 780$ мкс), который достигался за счет увеличения сопротивления движению ПК при использовании шероховатой оболочки и предварительно уплотненных образцов, в слое, примыкающем к продуктам сгорания ДРП, обычно формируется пикообразный профиль $p(x)$ с возрастающей по мере развития процесса амплитудой давления в пике. Фронт свечения в этом случае может располагаться как на нарастающей до $p_{\text{пик}}$ кривой давления, так и за пиком.

Появление и развитие перед фронтом пламени области с избыточным газовым давлением можно предположительно объяснить возникновением очага воспламенения с повышенным давлением, из которого затруднен отток образовавшихся газов, и появляющегося, например, вследствие охвата горением поверхности отдельных крупных пор центральной части образца. В некоторых экспериментах этот очаг фиксировался на оптических записях в виде яркой линии, движущейся на некотором расстоянии перед последующим фронтом свечения. Следует отметить, что появление очага с повышенным давлением не всегда ведет к возникновению и развитию конвективного горения. Существенную роль оказывает характер повышения давления на воспламенительном торце. Так, при замедлении темпа нарастания давления на воспламенительном торце в течение 1,97—2,2 мс в экспериментах с насыпным слоем ПК высотой 155 мм возникший при $t = 1,97$ мс пикообразный профиль давления с амплитудой в пике 135 атм (см. рис. 2, 3) в последующем уменьшался, и горение в этом случае не наблюдалось. Если на воспламенительном торце быстро нарастало давление ($t_e \leq 710$ мкс), то образовавшийся пикообразный профиль интенсивно развивался со временем (см. рис. 4).

Выводы

Изучены критические условия возникновения конвективного горения в слое порошкообразной пикриновой кислоты.

Выявлено влияние свойств ВВ, воспламенителя и состояния внутренней поверхности канала оболочки на критическую высоту слоя, характеризующую переход от послойного горения к конвективному.

Получены пространственные профили давления в процессе возникновения конвективного горения. Установлено, что для одинаковых по плотности и размеру частиц образцов характер распределения и значения давления во фронте пламени и за ним могут заметно различаться в зависимости от интенсивности протекания предшествующей стадии развития полости и уплотнения ВВ.

Показано, что в момент возникновения конвективного горения наблюдаются два заметно отличающихся профиля давления. Для одного характерно существование вблизи фронта пламени пикообразного распределения, для другого — наличие плавного повышения давления. Определены условия, в которых реализуется тот или иной профиль давления.

ЛИТЕРАТУРА

1. Беляев А.Ф., Боболев В.К., Коротков А.И. и др. Переход горения конденсированных систем во взрыв. — М.: Наука, 1973.
2. Серебряков М.Е. Внутренняя баллистика. — М.: Оборонгиз, 1949.
3. Зельдович Я.Б., Равин М.А., Франк-Каменецкий Д.А. Импульс реактивной силы пороховых ракет. — М.: Оборонгиз, 1963.
4. Храповский В.Е. О начальной стадии процесса при поджигании порошкообразного ВВ с закрытого торца // ФГВ. — 1993. — 29, № 2.
5. Ермолаев Б.С., Фотеенков В.А., Хасанов Б.А. и др. Критические условия перехода горения во взрыв в зерновых взрывчатых материалах // ФГВ. — 1990. — 26, № 5. — С. 102—110.
6. Андреев К.К., Беляев А.Ф. Теория взрывчатых веществ. — М.: Оборонгиз, 1960.

117977, г. Москва,
ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН

Поступила в редакцию
15/VI 1992,
после доработки — 5/V 1994

УДК 533.6.011

В.А. Левин, В.Н. Перегожин, А.Н. Хмелевский

ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРЫ ТЕЧЕНИЯ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ПОЛУЗАМКНУТОЙ ПОЛОСТИ

Приведены результаты экспериментального исследования особенностей истечения высокотемпературных продуктов сгорания ацетилено- и водородно-воздушных топлив через компактное кольцевое сопловое устройство с кормовой полузамкнутой полостью. Эксперименты выполнены в импульсной аэродинамической установке. Определены условия возникновения пульсаций давления и измерена их частота. Проведены измерения реактивной силы в зависимости от размера критического сечения соплового устройства и степени избытка окислителя. По результатам равновесных термодинамических расчетов параметров продуктов сгорания используемых топлив и измеренным значениям реактивной силы получены оценки величины удельного импульса кольцевого соплового устройства.

Продукты сгорания ракетных топлив после их расширения в соплах, обеспечивающих максимальную тягу двигателей, могут содержать в зависимости от вида топлива компоненты горючего (CO , H_2) и окислителя (O_2). Однако при расширении в соплах Левалея происходит достаточно глубокое «замораживание» химического состава смеси за счет быстрого расширения потока и падения поступательной температуры, в результате

© В.А. Левин, В.Н. Перегожин, А.Н. Хмелевский, 1995.